防空雷达飞机目标调制周期特征的研究

丁建江[1,2],张贤达[1]
(1. 清华大学自动化系,北京 100084; 2. 空军雷达学院重点实验室,湖北武汉 430010)

摘 要: 基于飞机旋转部件对雷达电磁波调制机理,以及对调制参数模型和回波特点的分析理解,本文针对防空雷达,分析了几种飞机目标的调制周期特征,提出了几种调制周期特征分析和提取的方法. 本文的主要贡献是揭示了防空雷达飞机回波复包络中的调制周期特征,分析了在不同飞机姿态、不同雷达工作状态下实际回波中调制周期特征的稳定性,并讨论了调制周期特征用于辨识螺旋桨飞机的可能性. 实测数据分析结果表明:本文方法能从防空雷达螺旋桨飞机回波中提取调制周期特征,并用于螺旋桨飞机的辨识.

关键词: 防空雷达; 调制周期特征; 特征分析与提取; 飞机识别
中图分类号: TN951, TN957 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2003) 06-0903-04

Study on the Periodic Signature Modulated by Rotating Structure of Aircraft in the Air-Defense Radar

DING Jian-jiang[1,2], ZHANG Xian-da[1]
(1. *Department of Automation, Tsinghua Univ, Beijing* 100084, *China*; 2. *Key Lab of Air-force Radar Academy, Wuhan, Hubei* 430010, *China*)

Abstract: This paper reveals the periodic signature modulated by rotating structure of aircrafts in the air-defense radar echoes, and presents some methods of analysis and extraction of the periodic signature, based on induction mechanism, parametric model of modulation and echo characteristics. The stability and reliability of the periodic signature in the actual echoes is analyzed under different conditions including aircraft configuration and orientation, radar parameters and operation. The probability of identification of propellers based on the periodic signature is discussed. The analyzed results demonstrate that the periodic signature is reliably and steadily extracted from the air-defense radar echoes using the proposed methods, and can be used for identification of propellers.

Key words: air-defense radar; periodic signature of modulation; analysis and extraction of features; recognition of aircrafts

1 引言

美国 Gardner 的实验报告[1]最早验证了不同频段雷达飞机回波中的调制谱现象. 1984 年法国 Jean 在 COTAL AV 自动跟踪雷达上对飞机回波闪烁频谱进行分析[2]; 1986 年美国 Fliss 用相干连续波在实验室精确测量了飞机旋转桨的调制谱[3],得到了与飞机旋转部件对应的调制谱. 20 世纪 90 年代,发表了一系列分析旋转部件对电磁波调制的理论研究文献. 例如,1990 年英国的 Martin 理论上分析了螺旋桨叶片的调制回波[4,5];台湾的 Yang 在 1997 年分析了螺旋桨飞机桨叶的电磁散射波[6];1994 年韩国的 Sun 分析了装有平板桨旋转部件的调制谱[7];1996 年法国的 Tardy 通过计算和实验分析了旋转扇的散射波[8];1997 年我国的黄培康教授也分析了旋转部件的调制特性[9]. 2001 年美国学者 Chen 对旋转桨的雷达特征进行了详细理论分析[10]. 其共同的结论是:旋转部件的调制谱以线谱形式位于连续波载频两侧,调制周期由桨数和桨速确定,与螺旋桨的方位角无关,适用于任何观测角. 基于这些研究结论,出现了许多用高重复频率雷达来测量直升机调制谱的文献[11,12]. 而防空雷达由于低重复频率、低分辨、窄带等体制和性能,影响了防空雷达回波中调制特性的研究,在一定程度上限制了防空雷达飞机目标识别的发展. 因此,本文基于飞机旋转部件对防空雷达电磁波调制机理、调制参数模型和回波特点,针对性提出了几种调制周期特征分析和提取的方法,揭示了防空雷达飞机回波中调制周期特征,并分析在不同飞机姿态和不同雷达工作状态下实际回波中调制周期特征的稳定性,为防空雷达辨识特种螺旋桨飞机奠定基础.

2 局部散射原理与调制特性参数模型

2.1 局部散射原理

窄带低分辨单极化防空雷达回波并不能像宽带高分辨多极化雷达信号反映飞机的距离像、极化和极点特征. 但防空雷达工作波长与飞机的尺寸相比,飞机散射都在光学区,飞机旋转部件(螺旋桨、旋翼、风扇、压缩器)的每一个桨可视为一个等效散射中心. 飞机等效散射中心的线性局部过程是光学区散射的基本特征. 若飞机由 p 个散射中心组成,则防空雷达回波复包络与各散射中心散射回波的关系为:

$$z(t) = a(t)\exp(j\Phi(t)) = \sum_{k=1}^{p} s_k \exp(j\theta_k(t)) \qquad (1)$$

收稿日期:2002-04-10;修回日期:2002-10-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 69772023)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中 s_k 和 $\theta_k(t) = 4\pi r_k(t)/\lambda$ 分别是第 k 个散射中心回波复包络的幅、相分量，$r_k(t)$ 为第 k 个散射中心离雷达的距离，λ 为雷达工作波长，展开式(1)有：

$$a(t) = \left\{ \left[\sum_{k=1}^{p} s_k \cos(\theta_k(t)) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{p} s_k \sin(\theta_k(t)) \right]^2 \right\}^{0.5} \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{\sum_{k=1}^{p} s_k \sin(\theta_k(t))}{\sum_{k=1}^{p} s_k \cos(\theta_k(t))} \right) \quad (3)$$

式(1)～(3)表明，飞机任一散射中心微小的相对运动，就有 $r_k(t) \rightarrow \theta_k(t) \rightarrow a(t) \rightarrow \varphi(t)$ 的一系列变化，这就是飞机旋转部件相对运动使回波复包络产生幅、相波动的物理机理，即调制特征产生原理.

2.2 调制特性参数模型

据文献[4,6,10]对位于雷达远场理想旋转部件在相参连续波照射下散射特性的分析，对有 N 个桨叶的旋转部件，其理想调制回波复包络参数模型可改写为：

$$s_b(t) = \sum_{k=0}^{N-1} k_b a_b(t) \exp(j\varphi_b(t)) \quad (4)$$

其中幅度分量是一 $\mathrm{sinc}(t)$ 脉冲函数，即

$$a_b(t) = \mathrm{sinc}\left(\frac{2\pi L}{\lambda} \cos\beta \sin\left(2\pi f_r, t + \frac{2\pi}{N} k + \theta_0 \right) \right) \quad (5)$$

相位分量为：

$$\varphi_b(t) = \frac{2\pi L}{\lambda} \cos\beta \sin\left(2\pi f_r, t + \frac{2\pi}{N} k + \theta_0 \right) + 2\pi f_d t \quad (6)$$

式中 $k = 0, 1, 2, \cdots, N-1$，f_r 为旋转频率，f_d 为径向运动 Doppler 频率，L 为有效桨长，β 为雷达视线与旋转面的夹角，θ_0 为基准桨旋转初相角，k_b 为系数. 式(4)～(6)表明理想旋转部件调制回波复包络的幅、相分量都受到 f_r 的周期性调制. 对式(4)进行傅氏变换，可得到复包络的频谱特性[4]

$$S_b(f) = \sum_{m=-N_1}^{N_1} C_m \delta(f - f_d - mpNf_r) \quad (7)$$

式(7)表明，理想调制回波频谱是由 f_d 为中心，周期为 $f_T = pNf_r$ 的一系列线谱组成，谱线周期由桨数 N 和桨速 f_r 决定；谱线幅度 C_m 由参数 $\lambda, L, \beta, N, \theta_0$ 和 Bessel 函数决定[4]；单边谱线个数 $N_1 = 8\pi L\cos\beta/(N\lambda)$；$p=1$ 或 $p=2$ 的意义是双桨或单桨同时垂直通过雷达视线. 而现代飞机的桨数和桨速已按空气动力学设计为最佳，巡航时螺旋桨是恒速转动，由自动变桨距来保证飞机不同速度所需的推力，这就表明调制周期 f_T 具有相对不变性，可用于飞机目标分类和辨识的特征.

当脉冲体制防空雷达天线扫过飞机目标时，其方位-距离二维回波复包络的调制特性参数模型可写成[13]

$$s(t) = a_s(t) \cdot (c_s s_s(t) + c_b s_b(t)) + c_n s_n(t) \quad (8)$$

式中 $s_s(t)$ 为机身分量；$s_b(t)$ 为受飞机结构和飞行姿态影响的所有调制分量；$s_n(t)$ 为噪声；$a_s(t)$ 是防空雷达系统特殊性影响，主要来自天线扫描形式、发射信号模型、接收机线性动态范围和系统稳定性；c_s, c_b, c_n 为归一化系数. 对式(8)傅氏变换和仿真表明，防空雷达螺旋桨飞机回波 f_T 特征仍然只取决于 N 和 f_r，与飞行姿态无关；但调制谱幅度和个数与飞机结构、飞行姿态、雷达系统有较复杂的关系，调制谱分辨率会受到防空雷达不同程度的影响[13].

3 调制周期特征的分析法

基于防空雷达回波是平稳、循环平稳和非高斯性质，分别采用以下方法分析回波中 f_T 特征.

3.1 脉间展开相位差分析法

在防空雷达天线扫过飞机的短时间内，机身分量、飞机随机波动、雷达参数变化被认为是平稳的，即飞机和雷达参数 (β, f_d, λ) 可视为不变. 但式(4)复包络仍然是 f_r 的时变函数. 在 $N=1$，$\theta_0=0$ 的简单情况下，对式(6)相位函数求时间导数，得合成 Doppler 频率为：

$$f_D(t) = \varphi_b'(t) = \frac{2\pi L}{\lambda} 2\pi f_r \cos\beta \cos(2\pi f_r t) + 2\pi f_d \quad (9)$$

定义 $k_d = (2\pi)^2 L\cos(\beta)/\lambda$ 为平稳性系数. 当考察时间较短时，k_d 可认为是常数；当 β 和 λ 变化时，k_d 是变量. 当补偿 f_d 分量后，则式(9)变为 $f_D(t) = k_d f_r \cos(2\pi f_r t)$，通过合适的时频分析法可估计 f_r 值[10]，即可求得飞机旋转桨的转速特征.

由于防空雷达低重复频率和天线扫描，$\varphi(t)$ 序列是有限的，$\varphi(t)$ 序列数值微分会产生较大误差，用脉间展开相位差 $\Delta\varphi_b = \varphi_b(t_n) - \varphi_b(t_{n-1})$ 来近似数值微分. 在式(6)中令 $\theta_0=0$ 和 $t = nT_r$，则脉间展开相位差为：

$$\Delta\varphi_b(n) = \sin\left(2\pi f_r n T_r + \frac{2\pi k}{N} \right) - \sin\left(2\pi f_r (n-1) T_r + \frac{2\pi k}{N} \right) \quad (10)$$

式中 $n = 0, 1, \cdots, N_a$，$k = 0, 1, \cdots, N-1$，N_a 为天线扫过飞机的有效回波数，T_r 为雷达重复周期. 式(10)充分表达了由 f_r 产生的调制相位差. 图1是实际螺旋桨飞机和直升机回波脉间展开相位差的分析结果，图中具有明显的 f_T 特征. 这一结果进一步说明了相位调制在调制特征产生中的作用.

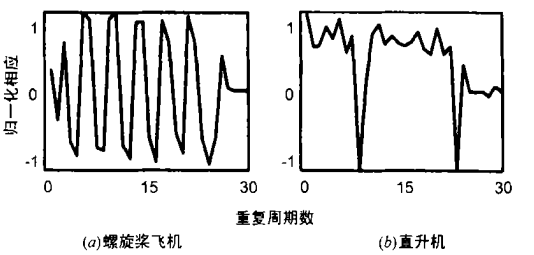

图1 不同飞机回波在脉间展开相位差中的调制周期特征

3.2 复包络无偏自相关分析法

仔细考察式(4)的幅、相分量，非平稳性的复包络函数是周期平稳的，可用自相关法分析复包络中的 f_T 特征. 设 $s(n)$ 为零均值横向回波复包络，$s^*(n)$ 是 $s(n)$ 的复共轭. 复包络无偏自相关法估计为：

$$R_z(m) = \frac{1}{N_a - |m|} \sum_{n=0}^{N_a - |m| - 1} s(n) s^*(n + |m|), \quad |m| \le N_a - 1 \quad (11)$$

图2是某螺旋桨飞机回波经自相关分析的调制周期特性. 可以看出：自相关幅度序列比原回波呈现更明显的周期

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性,其 f_T 特征的估值为 4 T_r,即 85Hz,与该型飞机 f_T 特征理论值 83Hz 接近. 当 $N_a \to \infty$ 时,式(11)的估计在理论上是无偏一致估计,能取得较好的估计精度,还具有硬件实现简单、实时性好的优点. 但这种方法估计 f_T 特征精度受到防空雷达低重复频率的限制.

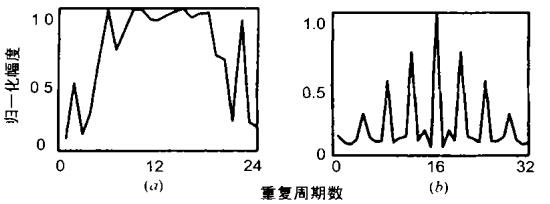

图 2　回波复包络无偏自相关法估计结果
(a)回波原幅度序列;(b)自相关幅度序列

3.3　复 AR 双谱切片分析法

由 Hinich 检验可以证明,实际防空雷达回波复包络是一典型的复非高斯信号,采用复 AR 频域双谱分析法能进一步揭示回波中 f_T 特征,特别是 f_d 和 f_T 之间的耦合. 而且 AR 峰谱模型能较好地描述式(7)的线谱,特别在防空雷达回波序列很短的情况下,选择 AR 模型比较适合调制谱的分析,用 SVD-TLS 算法可自动获取鲁棒的复 AR 系数和阶数,利用有限的雷达回波数,可得到最佳的谱分辨率和保真度.

据文献[14]对复双谱定义和式(8)防空雷达飞机回波复包络,本文选用三阶累积量的定义为:

$$C_{3s}(m,n) = E\{s^*(k)\,s(k+m)\,s(k+n)\} \qquad (12)$$

其中 $s(n)$ 和 $s^*(n)$ 的假设同上. 则对应双谱为:

$$B(f_1,f_2) = \sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{3s}(m,n)\exp(-j(f_1 m + f_2 n)) \qquad (13)$$

容易验证,式(13)结果只有 $B(f_1,f_2) = B(f_2,f_1)$ 一种对称关系,与实信号双谱有 6 种对称关系有明显的不同. 式(13)中令 $f_1 = 0$ 得 $B(0,f)$ 切片,通过 $(f_1 = f_d, f_2 = f_T)$ 点沿坐标轴作切片,得 $B(f_d,f_T)$ 切片.

图 3 是图 2 回波经复 AR 双谱处理后,幅、相分量的 $B(0,f)$ 切片. 可以看到,f_T 特征非常明显,也非常一致,且估计值为 83Hz,较自相关法精确. 图 4 是对三个不同姿态螺旋桨飞机回波经复 AR 双谱处理后的 $B(f_d,f_T)$ 切片. 分析比较可以得到:(1) $B(f_d,f_T)$ 比 $B(0,f)$ 能更好地展现 f_T 特征的不变特性. 不同姿态回波有不同的 f_d 和 $f_d \pm f_T$ 值;但有几乎相同的 f_T 值,并以零频为中心对称分布. 表明 f_T 特征与飞机的速度、姿态无关,具有相对不变性. 且 f_T 特征估值近似为 83Hz,与式(7)理论分析一致;(2)谱线个数和幅度特征受飞机姿态影响,相

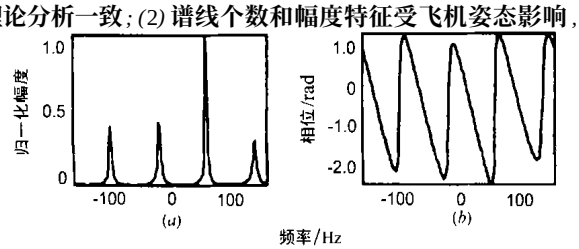

图 3　$b(0,f)$ 切片的幅、相特性
(a)幅度切片;(b)相位切片

对 f_d 是变化的. 则进一步表明式(8)参数模型能正确描述实际防空雷达飞机回波的调制特性.

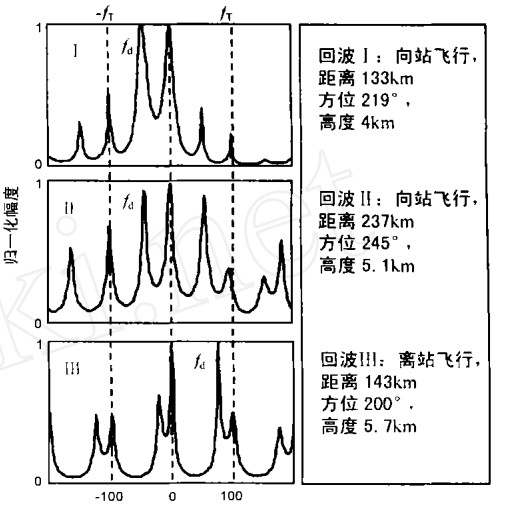

图 4　双谱幅度 $B(f_d,f_T)$ 切片的比较

4　调制周期特征稳定性分析

式已表明,实际防空雷达回波会受到多种因素的影响,从实际回波中提取的 f_T 特征是否稳定是实际应用中十分重要的问题. 在图 4 分析典型回波特征一致性的基础上,图 5 给出了两种螺旋桨飞机在 8 条航线上 246 组回波 f_T 特征的分布图. 从图 5(a) f_T 特征的分布性看:实际防空雷达回波的 f_T 特征有一些微小波动,与理论值有点差别,产生这种理论和实际差别的主要原因是调制谱分辨率有限和回波受到各种扰动. 图 5(b)是 180 组 A 型螺旋桨飞机的 f_T 特征直方图,除个别值外近似正态分布. 统计均值为 82.6Hz,与理论值 83Hz 接近,标

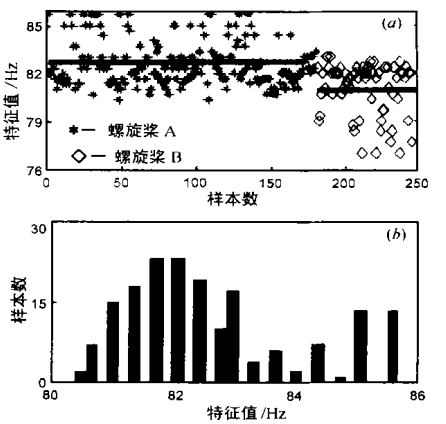

图 5　A、B 型螺旋桨飞机调制周期特征的分布特性
(a) A、B 型飞机回波周期特征分布;
(b) A 型飞机周期特征值直方图

准差为 1.44Hz,表明实际螺旋桨飞机回波的调制周期特征有较好的稳定性和可靠性.

图 6 是相同飞机同一航线不同雷达接收机回波调制谱的分析. 甲路接收机的带宽为 1MHz,飞机距雷达站 73km,回波有点限幅现象. 乙路接收机的带宽为 0.3MHz,飞机距雷达站

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

165km,回波是线性的. 从图 6(*a*)纵向回波的幅度特性看,不同接收机性能对回波边缘的影响已非常明显,但在图 6(*b*)的频谱特性可看到,它们尽管有不同的 f_d 和谱幅度,且有相同的 f_T 特征,表明这种雷达参数的变化不影响 f_T 特征.

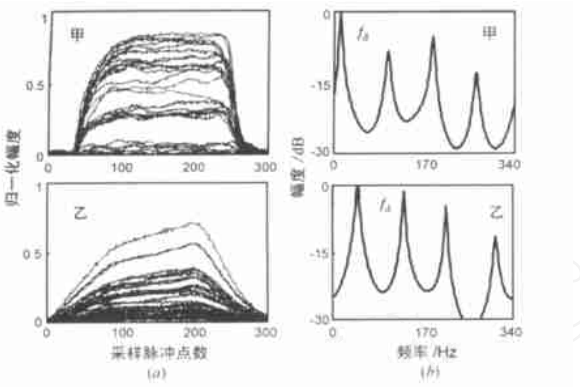

图 6 同一航线飞机不同接收机回波调制特性的分析
(*a*)纵向幅度特性;(*b*)对应的调制谱

5 基于调制周期特征辨识螺旋桨飞机的可能性

利用各类飞机间 f_T 特征的差别,在一定条件下分类飞机是可能的[13]. 以"飞机-雷达-辨识系统"联系的观点分析,防空雷达辨识特定螺旋桨飞机有以下有利条件.

(1)从电磁波散射的特点看:螺旋桨桨叶长度对 *P*,*L*,*S*,*C* 波段的防空雷达,满足光学区线性叠加散射机理. 桨叶材料大都为金属刚性,基于隐身机理和气动要求,在桨叶上难以增加吸波材料,电磁波散射好. 螺旋桨大小结构适中,可见度好,调制分量多,且受机身分量和噪声的影响小.

(2)从螺旋桨飞机运动特性看:机动能力差,飞行平稳,机身波动分量小;飞行高度和速度适合雷达探测,受地杂波干扰小;且常常单架飞行. 所以,螺旋桨飞机回波稳定性好,信噪比高,航迹连续,回波可用率高.

(3)从辨识系统看:由于螺旋桨飞机回波中 f_T 特征不仅具有明显、稳定、可靠、易提取的优点,而且与其它类有较大的类间距离[13]. 致使许多处理环节只要用固定的参数和较少的自适应处理,在软件和硬件设计上比较简单,处理实时性能得到保证.

(4)从雷达看:当防空雷达天线正常扫过螺旋桨飞机时,横向回波通常能覆盖多个螺旋桨的调制周期,表明辨识系统采集回波数据与雷达正常天线扫描不矛盾. 加装螺旋桨飞机自动辨识系统不会影响原雷达的正常工作,工程实现容易.

基于上述理由和本文的研究结论,再加上雷达站可用的先验知识,用现役防空雷达来辨识承担特种军事任务(巡逻、反潜、侦察、预警和电子干扰等)的螺旋桨飞机是可实现的.

6 结论

大量实际回波分析结果表明:防空雷达飞机回波复包络中含有飞机旋转部件产生的调制周期特征,这种调制周期特征既与飞机旋转部件物理特征相对应,又可用参数模型描述,用文中的方法能稳定地从回波中提取调制周期特征,可用于螺旋桨飞机的辨识. 本文的研究成果将对提高现役防空雷达飞机目标自动分类和辨识能力,具有理论和实际应用价值.

参考文献:

[1] R Hynes, R E Gardner. Doppler spectra of S band and X band signals [J]. Supplement to IEEE Trans. on AES. 1967, 3(6): 356 - 365.

[2] M Jean. Studies relating to the detailed structure of aircraft echoes[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Radar[C]. Atlanta: IEEE ICR, 1984. 275 - 280.

[3] G G Fliss, D L Mensa. Instrumentation for RCS measurements of modulation spectral of aircraft blades[A]. Proceedings of the IEEE National Radar Conference[C]. Los Angeles: IEEE AES Society. 1986. 95 - 98.

[4] J Martin, B Mulgrew. Analysis of the theoretical return signal from aircraft blades [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Radar[C]. Washington, 1990. 569 - 572.

[5] J Martin, B Mulgrew. Analysis of the effects of blade pitch on the radar return signal from rotating aircraft blades[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Radar[C]. London: IEEE ICR, 1992. 446 - 449.

[6] S Y Yang, S M Yeh. Electromagnetic backscattering from aircraft propeller blades [J]. IEEE Trans. on Magnetics. 1997, 33(3): 1432 - 1435.

[7] Y S Sun, N H Myung. Analysis of electromagnetic scattering by a rotating rotor with flat blades[A]. Proceedings of IEEE ICCS - 94[C]. Singapore: IEEE ICCS, 1994. 1044 - 1048.

[8] I Tardy, G P Pisu, P Chabrat. Computational and experimental analysis of the scattering by rotating fans [J]. IEEE Trans. on AP. 1996, 44(10): 1414 - 1421.

[9] H Luo, P K Huang, X J Xu. Doppler modulated features modeling and radar target recognition [A]. Proceedings of SPIE, Vol. 3069 [C]. Washington: International Society for Optical Engineering, 1997. 486 - 493.

[10] V C Chen. Radar signatures of rotor blades[A]. Proceedings of SPIE, 4391[C]. Washington: International Society for Optical Engineering, 2001. 63 - 70.

[11] D B Barry, P C Dowdy. Pulse Doppler signature of a rotary - -wing aircraft[J]. IEEE AES System Magazine. 1991, 6(5): 28 - 31.

[12] M R Bell, R A Grubbs. JEM modeling and measurement for radar target classification[J]. IEEE Trans. on AES. 1993, 29(11): 73 - 87.

[13] 丁建江. 飞机目标调制特征的研究及应用[D]. 北京:清华大学, 2002. 12.

[14] I I Jouny, R L Moses. On the bispectrum of complex signals: definitions and properties[J]. IEEE Trans on SP, 1992, 40(11): 2833 - 2836.

作者简介:

丁建江 男,1963 年生于浙江省上虞市,2002 年 12 月获清华大学工学博士学位,空军雷达学院副教授;曾获全军科技进步二等奖三项,以第一作者发表学术论文 30 多篇,主要研究领域为雷达目标智能检测和识别.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net